ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СДЕРЖИВАНИЯ РОСТА ТРЕЩИН В НЕФТЕГАЗОВОМ ОБОРУДОВАНИИ

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS FOR FRACTURE GROWTH CONTROL IN OIL AND GAS EQUIPMENT

В. А. Гафарова
Victoria A. Gafarova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В статье приводятся результаты комплексного исследования влияния композиционных материалов на основе эпоксидной смолы на сдерживание роста трещин в оборудовании, работающем при температурах до 120 °С. Изучены влияние различных наполнителей, разбавителей на текучесть жидкой фазы композиционного материала и прочностные свойства твердой фазы. Наилучшие результаты по всем показателям получены при применении в качестве наполнителя магнитного порошка микронных размеров с добавками магнитных частиц нано-размеров. На стандартных образцах, которые изготовлены из композиционного материала, определили предел прочности на растяжение. Все вариации составляющих композиционного материала позволяют получить значения предела прочности на уровне значений, полученных другими исследователями. В то же время испытания на изгиб показали существенное увеличения предела прочности при использовании в качестве наполнителя магнитных частиц. Отмечено, что магнитные частицы наполнителя реагируют на внешнее магнитное поле только при воздействии на жидкую фазу. При фазовых переходах магнитные частицы создают пространственные структуры, суммарный магнитный момент которых направлен к общему центру. Для увеличения проникновения в трещины композиционного материала предложены способ и устройство для его реализации, которые основаны на принципе создания вакуума над поверхностью трещины в момент нанесения жидкой фазы. Это позволяет увеличить глубину проникновения в 1,5 раза. Эффективность композиционного материала показана в процессе определения коэффициента интенсивности напряжений в кончике трещины (для первого типа трещины) на стандартных образцах. Для проведения сравнительных испытаний одна серия образцов полностью соответствовала требованиям стандарта. Другая серия отличалась тем, что после выращивания усталостной трещины полость последней заполнялась композиционным материалом. Значение коэффициента увеличилось в 2,25 раза по сравнению со стандартными образцами.

The paper presents the results of a comprehensive study of the effect of composite materials based on epoxy resin on fracture growth control in equipment operating at temperatures of up to 120 °C. The effect of various fillers, diluting agents on the yield behavior of the liquid phase of the composite material and the strength properties of the solid phase were studied. The best results for all parameters were obtained by using a micron-sized magnetic powder with additions of nano-sized magnetic

Ключевые слова

композиционный материал,
эпоксидная смола,
магнитные частицы,
предел прочности
на растяжение и изгиб

Key words

composite material,
epoxy resin, magnetic particles,
tensile and bending strength

particles as a filler. On standard samples, which were made of the composite material, the tensile strength was determined. All the variations in components of the composite material make it possible to obtain values of the ultimate strength at the level of values obtained by other researchers. At the same time, bend tests showed significant increase in the strength limit when using magnetic particles as a filler. It was noted that the magnetic particles of the filler react to the external magnetic field only when exposed to the liquid phase. In phase transitions, magnetic particles create spatial structures, the total magnetic moment of which is directed toward the common center. In order to increase the degree of composite material penetration into the fractures, a method and an apparatus for its performance, which are based on the principle of creating a vacuum above the fracture surface at the moment of the liquid phase application, were proposed. This allows increasing the depth of penetration by 1.5 times. The efficiency of the composite material is shown in the process the stress intensity factor in the crack tip (for the first type of crack) determination on standard samples. In order to conduct comparative tests, one series of samples fully complied with the requirements of the standard. Another series differed in the fact that after growing a fatigue fracture, the cavity of the latter was filled with a composite material. In comparison with standard samples, the value of the coefficient increased by 2.25 times.

Введение

Многочисленные исследования показывают, что металлические конструкции, эксплуатируемые в нефтегазовой отрасли, подвержены влиянию множества негативных факторов. К таким факторам, прежде всего, следует отнести различные виды коррозии, циклические нагрузки, действие высоких температур, диффузию углерода, водорода. Все эти процессы приводят к образованию трещин. Трещины и трещиноподобные дефекты могут сопутствовать различным операциям на стадии изготовления (сварка, штамповка, литье). С одной стороны, трещины являются наиболее опасным дефектом, так как являются зоной концентрации механических напряжений, с другой стороны, устранение таких дефектов приводит к значительным затратам. В последнее время внедрены для использования в разных странах стандарты, регламентирующие работу оборудования с трещинами [1-3]. Конструкции с такими дефектами функционируют до предельного состояния, которое соотносится с критическими размерами трещины. Несмотря на возможность функционирования оборудования с трещинами, последние представляют собой потенциальную опасность и могут привести к разрушению конструкции [4-6].

Экспериментальные исследования

Возможность функционирования конструкций с трещинами можно установить еще на стадии проектирования [7]. Для этого необходимо знать для материала конструкции

критический коэффициент интенсивности напряжений в кончике трещины. Стабильное и нестабильное состояния конструкции определяются в зависимости от соотношения реального размера трещины и критической длины трещины.

Различают три основных типа формирующихся трещин со своими коэффициентами: отрыв K_1 , поперечный сдвиг K_2 , продольный сдвиг K_3 [8].

Дж. Ирвин предложил силовой критерий разрушения для первого типа трещины [5]:

$$K \leq K_c \text{ или } K \leq K_{Ic},$$

где K — коэффициент интенсивности напряжений; K_c — критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации; K_{Ic} — коэффициент интенсивности напряжений в кончике трещины (для первого типа трещины).

Для растянутой плоскости можно написать:

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi l_c} \chi, \quad (1)$$

где σ — приложенное напряжение; l_c — критическая длина трещины; χ — коэффициент, учитывающий геометрию концентратора (стремится к единице).

Из соотношения (1) можно определить длину трещины, которая будет развиваться при данном виде нагружения:

$$l_c = K_2^2 I_c / \pi \sigma^2. \quad (2)$$

Два обстоятельства заставляют искать пути уменьшения рисков при эксплуатации объектов с трещинами. Во-первых, не исключается

возможность развития нештатных ситуаций вследствие нарушения технологического режима работы оборудования или возникновения природных явлений, которые могут изменить напряженно-деформированное состояние в кончике трещины и обеспечить прирост размера трещины.

Во-вторых, исследования показывают, что критический коэффициент интенсивности напряжений не является константой материала и может изменяться в процессе эксплуатации конструкции [9]. В связи с этим актуальной проблемой является создание композиционных материалов, которые в жидком состоянии могут заполнить полость трещины, а после формирования твердой фазы обеспечить надежное крепление берегов трещины. Такой способ закрепления употребляется для ремонта трещин на лобовом стекле автомобилей. В работе [10] предлагается сдерживать берега трещины в нефтегазовом оборудовании пастообразной твердеющей мастики. Такой способ может быть эффективно применен для заделки неглубоких трещиноподобных дефектов.

На рисунке 1 показана задвижка, в корпусе которой обнаружена трещина, которая образовалась в зоне сопряжения разнотолщинных цилиндров. В этой зоне действуют изгибные напряжения от реализации краевых сил и моментов. При таком напряженно-деформированном состоянии поверхностное закрепление берегов трещины может оказаться неэффективным.

Для приготовления композиционных материалов в жидкой фазе с последующим отверждением широко применяют эпоксидные смолы [11], которые по сравнению с конкурирующими веществами, такими как фенолформальдегидные смолы, выделяют наименьшее количество вредных веществ [12].

1 — тарелка фланца; 2 — ступица (патрубок) фланца; 3 — стакан корпуса; 4 — трещина в зоне сопряжения тарелки фланца с патрубком
Рисунок 1. Трещина в корпусе задвижки

Обладея хорошей текучестью в жидкой фазе, эпоксидные смолы при твердении становятся хрупкими. Для придания прочности при создании композиционного материала используют наполнители различной природы [13]. Авторами в экспериментах использовались различные наполнители: алюминиевый порошок, графит, карбонильное железо, кварц, кремнь, шунгит. Полученные с этими наполнителями композиционные материалы обладали достаточно низкими показателями прочности 6-10 МПа и коррелировали по этим показателям с результатами других исследователей [14].

Для дальнейших исследований использовали в качестве наполнителя магнитный порошок из диоксида железа, полагая, что магнитные частицы могут при взаимодействии между собой и берегами трещины создавать пространственные структуры, улучшая прочностные свойства композита. Микроструктура алюминиевого и магнитного порошков показана на рисунке 2.

а)

б)

Рисунок 2. Фотографии наполнителей, полученные при увеличении x200: порошок алюминия (а) и магнитный порошок (б)

Из литературных источников известно, что использование частиц наноразмеров в композиционных материалах повышает их текучесть в жидком состоянии и улучшает прочностные свойства после формирования твердой фазы [15]. В связи с этим были проведены эксперименты с использованием магнитных наночастиц в качестве добавки. Использовали для этих целей магнитную жидкость, содер-

жащую магнитные наночастицы оксида железа размерами 8–30 нм, стеариновую кислоту в качестве стабилизатора и керосин в качестве носителя.

Сравнительные эксперименты проводили при определении следующих свойств композиционных материалов: твердости, усадки и текучести. Результаты отражены в таблице 1.

Таблица 1. Определение твердости, усадки, текучести композиционного материала

Соотношение компонентов	Наполнитель	Результаты измерения твердости, HR15T	Усадка, мм	t, мин	v, мм/мин
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (магнитная жидкость на керосине) Наполнитель	Магнитный порошок	35,4	0,2	5	6,8
	Алюминиевый порошок	18,5	1,2		5,4
	Карбонильное железо	14,5	1		6,6
	Графит	16	1		6,4

Из данных таблицы 1 видно, что магнитный порошок в совокупности с магнитными частицами наноразмеров показал по всем испытаниям лучший результат. При практически одинаковой текучести, композиционный материал с наполнителем из магнитного порошка и добавкой наномангнитных частиц показал существенно меньшую усадку и высокую твердость.

Следующая серия экспериментов была направлена на выяснение возможности исследуемых материалов глубоко проникать в трещину. При этом испытывали устройство для создания вакуума над полостью трещины [15] и изучения влияния глубины вакуума на степень заполнения искусственного трещиноподобного дефекта, у которого менялось расстояние между берегами. В таблице 2 представлены результаты экспериментов. Анализ полученных данных позволяет сделать некоторые выводы. Создание вакуума существенно увеличивает глубину проникновения

композиционного материала в полость. Керосин при прочих равных условиях улучшает проникающую способность.

Следующим важным результатом является то, что добавление частиц наноразмеров в композиционный материал делает его слабо чувствительным к глубине вакуума и расстоянию между берегами трещины. Это указывает на перспективность использования в качестве добавки частиц наноразмеров.

Определение прочности на растяжение проводили на динамометре «Instron» с использованием стандартных образцов (рисунок 3).

Для получения образцов на 3D-принтере изготавливали формы, в которые заливали сформированный жидкий композиционный материал. Готовые образцы выдерживали до полного затвердевания и затем разрушали при испытаниях на одноосное растяжение. Характер изломов указывает на хрупкое разрушение образцов для всех использованных в эксперименте наполнителей. При исполь-

Таблица 2. Влияние уровня вакуума на проникновение

Соотношение компонентов	Наполнитель	Зазор, мм	Глубина проникновения, мм	Глубина вакуума, МПа				Атмосферное давление
				0,03	0,05	0,07	0,09	
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (муравьиный спирт) Наполнитель	Магнитный порошок	0,1		10,9	8,9	5,1	5,0	3,9
		0,2		12,8	12,3	6,1	5,5	4,0
		0,3		15,9	14,2	10,8	10,0	5,0
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (магнитная жидкость на керосине) Наполнитель	Магнитный порошок	0,1		19,0	18,4	18,2	17,8	10,7
		0,2		19,5	18,6	18,5	17,9	10,9
		0,3		19,6	19,4	19,9	20,9	11,1
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (керосин) Наполнитель	Магнитный порошок	0,1		12,7	11,0	10,0	9,9	6,8
		0,2		16,5	16,5	15,0	14,8	7,3
		0,3		17,7	17,0	17,0	17,1	7,5

а) магнитный порошок; б) алюминиевый порошок; в) графит; г) карбонильное железо

Рисунок 3. Образцы из композиционного материала с разными наполнителями

зовании в качестве наполнителя алюминиевого порошка, графита и карбонильного железа получили сравнимые данные и превышающие значения, представленные в различных источниках. Результаты испытания показаны в таблице 3.

Применение добавки в виде магнитных частиц наноразмеров переводит композитные материалы (КМ) в другую категорию, поскольку прочность повышается до 50 МПа (таблица 4). Это значение на порядок превышает имеющиеся в литературе данные.

Одним из наиболее важных показателей прочности КМ является прочность на изгиб. Часто трещины в оборудовании возникают в области сопряжения элементов с различным радиусом кривизны, разнотолщинных элементов, в которых возникают изгибные напряжения. Необходимо выяснить, как разрабатываемые КМ реагируют на изгиб. Для этого провели эксперименты, реализующие простую схему нагружения, показанную на рисунке 4.

Таблица 3. Характеристики прочности композиционных материалов

Соотношение компонентов	Наполнитель	Предел прочности, МПа
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (муравьиный спирт) Наполнитель	Алюминиевый порошок	18
	Графит	18
	Магнитный порошок	26
	Карбонильное железо	15

Таблица 4. Характеристики прочности КМ с магнитными наполнителями и разбавителем — керосином

Соотношение компонентов	Наполнитель	Предел прочности, МПа
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (магнитная жидкость на керосине) Наполнитель	Магнитный порошок	70
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (керосин) Наполнитель	Магнитный порошок	48

Рисунок 4. Схема проведения испытаний на изгиб

Результаты эксперимента представлены в таблице 5. Тенденция, которая была обнаружена при испытаниях на растяжение, сохранилась и при испытаниях на изгиб. При прочих равных условиях применение магнитного порошка в качестве наполнителя повышает

прочность на изгиб в 1,5 раза по сравнению с другими наполнителями. В КМ с наполнителем — магнитным порошком при применении в качестве разбавителя керосина прочность увеличивается от 1,5 до 2,0 раза, добавление магнитной жидкости на основе керосина повышает прочность еще на 10–15 %.

Таблица 5. Результаты испытаний образцов на изгиб

Соотношение компонентов	Наполнитель	Зазор, мм	Предел прочности на изгиб, МПа
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (муравьиный спирт) Наполнитель	Магнитный порошок	0,1	30
		0,2	42
		0,3	42
	Алюминиевый порошок	0,1	32
		0,2	32
		0,3	27
	Карбонильное железо	0,1	32
		0,2	27
		0,3	21
	Графит	0,1	32
		0,2	27
		0,3	27
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (магнитная жидкость на керосине) Наполнитель	Магнитный порошок	0,1	85
		0,2	74
		0,3	78
	Алюминиевый порошок	0,1	58
		0,2	58
		0,3	48
	Карбонильное железо	0,1	43
		0,2	32
		0,3	27
	Графит	0,1	58
		0,2	32
		0,3	32
Эпоксидная смола Отвердитель Разбавитель (керосин) Наполнитель	Магнитный порошок	0,1	61
		0,2	67
		0,3	71
	Алюминиевый порошок	0,1	32
		0,2	48
		0,3	21
	Карбонильное железо	0,1	48
		0,2	32
		0,3	21
	Графит	0,1	27
		0,2	27
		0,3	21

Последняя серия экспериментов была направлена на решение проблемы повышения трещиностойкости. Суть экспериментов состояла в том, что испытанию подвергались стандартные образцы (ГОСТ 25.506-85) на

внецентренное растяжение с выращенной усталостной трещиной.

При испытании первой серии образцов получали диаграмму деформирования и определяли K_{Ic} (рисунок 5).

Рисунок 5. Результаты испытания стандартного образца на K_{Ic}

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы: удалось заполнить полость реальной пророщенной усталостной трещины, причем трещина была заполнена полностью; удалось увеличить K_{Ic} в 1,5 раза, что дает увеличение критической длины тре-

щины в 2,25 раза. Визуальные наблюдения показали, что, отрыв носит адгезионный характер: отрыв произошел от одного из берегов трещины (рисунок 6). Обращает на себя внимание тот факт, что имеются островки отрыва по телу металла.

Рисунок 6. Результаты испытания образца с заполненной композиционным материалом трещиной на K_{Ic}

Выводы

Испытания на трещиностойкость подтвердили перспективность применения разработанных композиционных материалов для закрепления берегов реальных трещин. При

этом получили существенное увеличение в 2,25 раза критической длины трещины, что уменьшает риск страгивания трещины при нештатных ситуациях.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ASME B31G-2009. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping / ASME. 2009. 58 p.
2. BS 7910:2013+A1:2015. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. BSI Standards Publication, 2015. 492 p.
3. РД-23.040.00-КТН-011-16. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов.

Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами. М., 2014. 183 с.

4. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях. Уфа: Монография, 2003. 803 с.

5. Зайнуллин Р.С., Морозов Е.М., Александров А.А. Критерии безопасного разрушения элементов трубопроводных систем с трещинами. М.: Наука, 2005. 316 с.

6. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч.1: Критерии прочности и ресурса. Новосибирск: Наука, 2005. 494 с.

7. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.

8. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. СПб.: Профессия, 2002. 320 с.

9. Кузеев М.И. Закономерности накопления повреждений в сварных соединениях оболочек реакторов установок замедленного коксования: дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 2000. 126 с.

10. Крутиков И.Ю. Восстановление работоспособности деталей технических устройств с трещиноподобными дефектами композитными материалами: дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 2010. 124 с.

11. Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.

12. Ковачич Л. Склеивание металлов и пластмасс. М.: Химия, 1985. 240 с.

13. Назаренко О.Б., Мельникова Т.В., Висак П.М., Нгуен А.Т. Влияние комбинированного наполнителя на термическую стойкость эпоксидных композитов // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: матер. XXI Всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. Томск, 2015. Т. 2. С. 29–32.

14. Баженов С.Л. Механика и технология композиционных материалов: научное издание. Долгопрудный: Издательство «Интеллект», 2014. 328 с.

15. Пат. № 2601782 РФ. МПК: F16L57/02. Способ восстановительного ремонта трубопровода и устройство для его осуществления / В.А. Гафарова, И.Р. Кузеев, А.Д. Мингажев. № 2015122333/06, Заявлено 10.11.2015. Опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31.

REFERENCES

1. ASME B31G-2009. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping (ASME). 2009. 58 p.

2. BS 7910:2013+A1:2015. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. BSI Standards Publication, 2015. 492 p.

3. RD-23.040.00-KTN-011-16. Magistral'nyi truboprovodnyi transport nefii i nefteproduktov. Opredelenie prochnosti i dolgovechnosti trub i svarnykh soedinenii s defektami [РД-23.040.00-KTN-011-16. Major Pipeline Oil and Petroleum Products Delivery. Determination of Defective Pipelines and Welded Joints Reliability and Durability]. Moscow, 2014. 183 p. [in Russian].

4. Shanyavskii A.A. Bezopasnoe ustalostnoe razrushenie elementov aviakonstruktsii. Sinergetika v inzhenernykh prilozheniyakh [Safe Fatigue Failure of Aircraft Structure Elements. Synergetics in Engineering Applications]. Ufa, Monograph Publ., 2003. 803 p. [in Russian].

5. Zainullin R.S., Morozov E.M., Aleksandrov A.A. Kriterii bezopasnogo razrusheniya elementov truboprovodnykh sistem s treshchinami [Criteria of Safe Breakdown of Pipeline Systems Fractured Elements]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 316 p. [in Russian].

6. Makhutov N.A. Konstrukcionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. Ch.1: Kriterii prochnosti i resursa [Structural Strength, Resource and Technogenic Safety. Part 1: Criteria of Strength and Resource.]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 494 p. [in Russian].

7. Kollinz Dzh. Povrezhdenie materialov v konstruktivnykh. Analiz. Predskazanie. Predotvrashchenie [Damage of Materials in Structures. Analysis. Prediction. Prevention]. Moscow, Mir Publ., 1984. 624 p. [in Russian].

8. Pestrikov V.M., Morozov E.M. Mekhanika razrusheniya tverdykh tel: kurs lektzii [Solid Bodies Fracture Mechanics. Course of Lectures]. Saint-Petersburg: Profesiya Publ., 2002. 320 p. [in Russian].

9. Kuzeev M.I. Zakonomernosti nakopleniya povrezhdenii v svarnykh soedineniyakh obolochek reaktorov ustanovok zamedlennogo koksovaniya: dis. kand. tekhn. nauk [Regularities of Damage Accumulation in Welded Joints of Reactor Shells of Delayed Coking Units: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2000. 126 p. [in Russian].

10. Krutikov I.Yu. Vosstanovlenie rabotosposobnosti detalei tekhnicheskikh ustroystv s treshchinopodobnymi defektami kompozitnymi materialami [Restoration of Operability of Technical Devices Details with Fracture-Like Defects by Means of the Composite Materials: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2010. 124 p. [in Russian].

11. Vil'nav Zh.-Zh. Kleevye soedineniya [Adhesive-Bonded Joints]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 384 p. [in Russian].

12. Kovachich L. Skleivanie metallov i plastmass [Bonding of Metals and Plastics]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240p. [in Russian].

13. Nazarenko O.B., Mel'nikova T.V., Visak P.M., Nguen A.T. Vliyanie kombinirovannogo napolnitelya na termicheskuyu stoikost' epoksidnykh kompozitov [Influence of the Combined Filler on Thermal Resistance of Epoxy Composites]. Materialy XXI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'» [Proceedings of XXI All-Russian Scientific and Technical Conference «Energetics: Efficiency, Reliability, Safety»]. Tomsk, 2015. pp. 29-32.2. [in Russian].

14. Bazhenov S.L. Mekhanika i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov: nauchnoe izdanie. [Mechanics and Technology of Composite Materials: Scientific Edition]. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2014. 328 p. [in Russian].

15. Gafarova V.A., Kuzeev I.R., Mingazhev A.D. Spособ vosstanovitel'nogo remonta truboprovoda i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of Pipeline Restorative Maintenance and Apparatus for its Performance]. Patent RF, No. 2601782, 2016. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ ABOUT THE AUTHOR

Гафарова Виктория Александровна, преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Victoria A. Gafarova, Lecturer of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gafarova.vika@bk.ru